

AE 진폭분포를 이용한 고장력강의 파괴 특성평가

서정원*, 석창성**, 김영진**, 박지우***

Evaluation of Fracture Behavior of High Tension Steel by AE Amplitude Distribution

J.W.Seo*, C.S.Seok**, Y.J.Kim**, J.W.Park***

ABSTRACT

Acoustic emission(AE) measurement was carried out to evaluate the fracture behavior of high tension steel. Fracture toughness K_{AE} could be determined reasonably by using the load value corresponding to an abrupt change of the accumulated AE counts of AE emitted from the test specimens. AE characteristics of the base metal, the weld metal and the heat-affected zone could be distinguished using a constant value b which represented the AE amplitude distribution. Consequently the structure integrity can be evaluated by variation of the constant b at the load level. In addition it was found that AE signals due to crack growth have high amplitude but low rise time and duration.

Key Words : Acoustic Emission(음향방출법), Fracture Toughness(파괴인성치), K_I (응력확대계수), AE-Event Counts(음향방출 사상계수), Amplitude Distribution(진폭분포)

기호설명

- a : 균열길이
- K : 응력확대 계수
- E : 탄성계수
- σ_{YS} : 항복강도
- P_{AE} : 균열진전 개시점의 하중
- K_{AE} : AE법에 의한 파괴인성치
- V_p : 진폭에 대한 전압
- b : 진폭분포를 평가한 상수
- N : 사상계수
- B : 시편두께
- Δa_p : 실제 균열진전량
- Δa_e : 컴플라이언스에 의한 균열진전량

1. 서론

음향방출(Acoustic Emission : AE)이란 물체가 변형을 일으킬 때 방출되는 탄성파이다. AE의 발생 원으로는 소성변형, 균열발생 및 성장, 마찰기구, 개재물의 파괴 및 상변화등에 의한 것으로 알려져 있다.⁽¹⁾

최근 구조물의 안전성 평가를 위한 방안으로 비파괴검사가 널리 실용화되고 있다. 비파괴검사법에는 초음파탐상법(ultrasonic test), 자기탐상법(magnetic particle test), 방사선탐상법(radiography test) 등이 있으나, 이러한 방법들은 재료의 변형 및 구조물의 가동을 중단시킨 정적 상태에서에서만 사용할 수 있다. 그러나 AE를 사용하면 전위의 운동, 균열의 전파등 변형 중의 탄성에너지

* 한국철도기술연구원
 ** 성균관대학교 기계공학부
 *** 국방과학연구소

가 해방될 때 방출되는 탄성파를 검출할 수 있기 때문에 재료내의 동적인 구조변화를 알 수 있다. 따라서 AE법을 이용하면 가동중인 구조물의 결함 위치뿐만 아니라 구조물의 파괴진단에도 적용할 수 있다. AE법의 실용화를 위해서는 구조물내의 결함의 위치, 크기, 손상정도 등을 AE신호에 의하여 유추해야하고, 결함에 의한 신호와 다른 신호를 구별할 수 있는 잡음제거기준이 필요하다.⁽²⁻³⁾ 또한, AE신호는 재료에 의존하므로 각 재료에 대한 신호특성을 평가·분류하여야 하며, 그에 따른 파손여부를 평가하는 기준이 제시되어야 한다.

Nakamura⁽⁴⁾는 재료의 신호방출특성을 진폭분포를 사용하여 평가하였고, Kanji 등⁽⁵⁾은 진폭분포를 정량화하여 미시파괴과정을 평가하였다. 일본기계학회⁽⁶⁾가 제정한 AE를 이용한 탄소성파괴인성치 측정시험에서는 재료에서 발생하는 AE신호특성을 Type A, B, C로 분류하였다. Christoph 등⁽⁷⁾은 피로실험을 통하여 균열진전에 의한 신호와 균열표면마찰에 의한 신호를 분류하였으나, 균열진전에 의한 신호특성을 평가하지는 못하였다. 한편 Blanchette 등^(8,10)은 응력확대계수(Stress Intensity Factor : K)와 사상계수(Count : N)의 관계로부터 K_{AE} 를 결정하였고, 일본기계학회⁽⁶⁾에서는 N과 변위(δ_{in})의 관계로부터 파괴인성치(K_{in} , J_{in})를 결정하였다.

본 연구에서는 AE법을 이용하여 고장력강의 모재, 용접재 그리고 열영향부(Heat Affected Zone : HAZ)에 대하여 하중과 N의 관계로부터 파괴인성치 K_{AE} 를 결정하였다. 각 재료에 대한 AE방출특성을 진폭분포를 사용하여 평가하고, 진폭분포를 표시하는 상수값 b 로써 신호특성을 분류하였다. 그리고 각 하중 단계별 b 값의 변화를 이용하여 재료의 파손여부를 평가하는 기준을 제시하였다. 또한 균열진전에 의한 신호와 그렇지 않은 신호를 분류하여 AE법의 적용 타당성을 검토하였다.

2. 실험 방법

2.1 시험편

본 실험에서는 고장력강 HTS-A(High Tension Steel A)와 고장력강 HTS-B(High Tension Steel B)의 모재 및 용접재를 사용하였으며, 화학적 성분은 Table 1에, 기계적 성질은 Table 2에 나타내었다.

Table 3과 Table 4는 용접봉의 종류, 예열온도

등에 따른 K_{IC} 와 J_{IC} 실험을 위한 시편종류를 나타낸 것이며, 실험에 사용된 시편은 두께(B)가 13.5mm, 너비(W)가 27mm인 CT(Compact Tension)시편으로 압연 방향에 따라 T-L 방향으로 채취하였다. Fig. 1은 시험에 사용된 용접재 시편의 형상을 나타낸 것이며, 용접층은 5개의 층으로 이루어져 있다.

Table 1 Chemical composition of specimen, wt.%

Material	C	Mn	P	S	Ni	Si	Cu	Cr	V	Mo	Al	Ti
HTS-A	0.19	0.25	0.006	0.005	2.9	0.20	-	1.45	-	0.37	0.044	0.048
HTS-B	0.22	0.26	0.001	0.015	3.1	0.19	<0.1	1.06	<0.01	0.15	0.03	-

Table 2 Mechanical properties of specimen

Material	Yield strength (MPa)	U.T.S. (MPa)	Elongation (%)	Poisson's ratio
HTS-A	900	1100	15	0.27
HTS-B	1068	1186	13.3	0.27

Table 3 K_{IC} Test specimen matrix

Material	Weld procedure	Preheating temp.	Welding rod	Location	Specimen number
HTS-A	GMAW	93 °C	LTEC 95	Base	FT 15
				Weld	FT 1
			HAZ	FT 5	
		LTEC 120	Weld	FT 2	
			HAZ	FT 6	
		150 °C	LTEC 95	Weld	FT 3
	HAZ			FT 7	
	LTEC 120		Weld	FT 4	
			HAZ	FT 8	
	SMAW	150 °C	MIL-E-11018	Weld	FT 9
HAZ				FT 10	
HTS-B	GMAW	93 °C	LTEC 95	Base	FT 16
				HAZ	FT 11
		LTEC 120	HAZ	FT 12	
			150 °C	LTEC 95	HAZ
		LTEC 120			HAZ

Table 4 J_{IC} Test specimen matrix

Material	Location	Specimen number
HTS-A	Base	J-1
	Base	J-2
	Base	J-3
HTS-B	Base	J-4
	Base	J-5
	Base	J-6

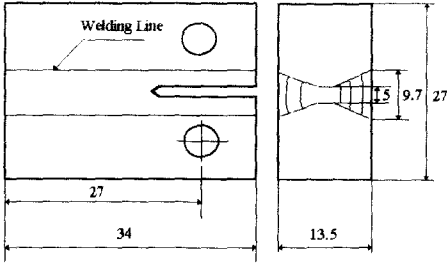


Fig. 1 Geometry for Welding Specimen

2.2 실험 장치 및 방법

파괴인성 시험에서는 Instron사 25ton용량의 전기유압식 만능시험기를 사용하였으며, ASTM E399⁽⁹⁾의 실험절차에 따라 균열개시점에서의 응력 확대계수 K_Q 와 ASTM E813-89에 따라서 J_{IC} 를 측정하였다.

AE계측에는 PAC사의 R-15센서(150kHz 공진형)와 LOCAN 320 시스템을 사용하였으며, 발생하는 신호를 민감하게 수집하기 위해 시편과 센서 사이에 실리콘 그리스를 얇게 바른 후 천테이프로 센서를 압착하였다. 또한, 시편과 핀사이의 마찰에 의한 소음을 제거하기 위하여 핀에 테프론 테이프를 감고 실험을 하였으며, 센서로부터 검출된 신호는 100 ~ 300 kHz 범위의 필터(band pass filter)를 통하여 기계적 잡음과 소음을 제거하였다. 필터를 통하여 여과된 신호를 선증폭기(pre-amplifier)에서 40dB로 증폭한 후 주증폭기(main amplifier)에서 20dB로 증폭하였고, 문턱값(threshold value)은 1 V로 고정하였다.

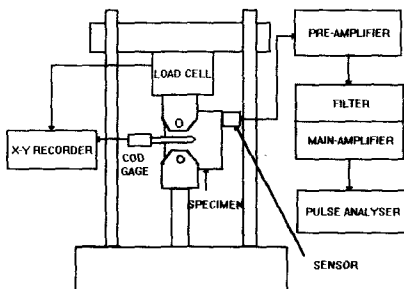


Fig. 2 Schematic diagram of AE measuring system

실험을 통해서 얻은 AE 데이터들은 후처리과정을 통하여 하중 단계별로 사상계수(count), 진폭(amplitude), 에너지분포 등을 구하는데 이용되었다. 핀과 시편면이 접촉하면서 발생한 잡음에 의한 AE신호가 범준 하중인 980N이하에서 발생하는 신호는 해석에 사용하지 않았다.

Fig. 2는 전체적인 실험 개략도를 나타낸 것이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 하중변위곡선 및 파괴인성치

Fig. 3은 실험에서 구한 HTS-A의 모재, 용접재 및 HAZ의 하중-변위곡선을 나타낸 것이며, Fig. 4는 HTS-B의 모재와 HAZ의 하중-변위곡선을 나타낸 것이다.

하중-변위곡선을 비교하면 HTS-B가 HTS-A보다 전반적으로 인성이 작으며, HTS-A에서는 SMAW 용접재가 GMAW 용접재보다 인성이 작게 나타났다. Fig. 5는 하중-변위곡선에서 선형부분의 기울기가 5% 낮은 직선과 교차되는 하중 P_Q 로부터 K_Q 를 결정하여 나타낸 것으로서, HTS-A 및 HTS-B의 K_Q 값은 70 - 120 $MPa\sqrt{m}$ 까지 분포하고있으며, 여기서 모재부분의 하중-변위곡선이 다른 부위에 비하여 최대하중이 크게 나타나 K_Q 값 역시 크게 나타났고, GMAW 용접재(FT 1, FT 3)는 하중-변위곡선의 최대하중이 낮고 연성적이어서 K_Q 값이 작았다.

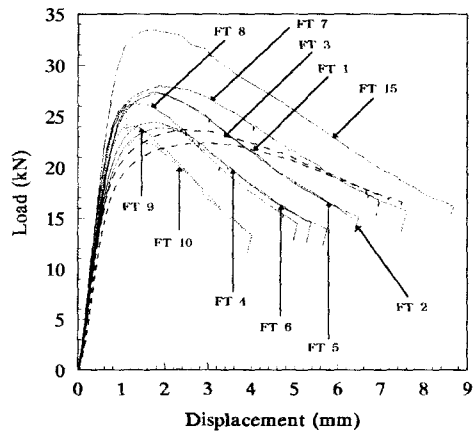


Fig. 3 Load-displacement curve for HTS-A

또한, 모재의 경우는 하중-변위곡선의 최대하중은 비슷하였으나, HTS-B가 HTS-A보다 최대하중 이전까지 선형적으로 증가하고 인성이 작은, 즉 취성이 큰 재료이기 때문에 HTS-B의 K_Q 값이 HTS-A의 값보다 커짐을 보이고 있다. HTS-A와 HTS-B 모두 ASTM E399의 평면변형률조건을 만족하지 못하였다.

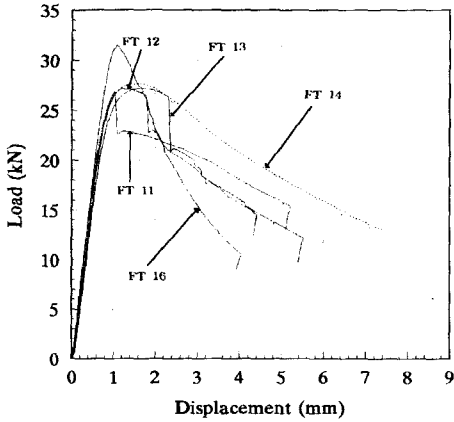


Fig. 4 Load-displacement curve for HTS-B

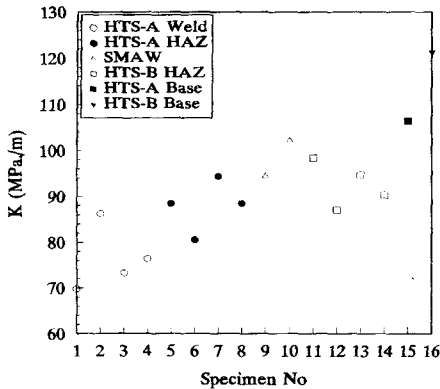
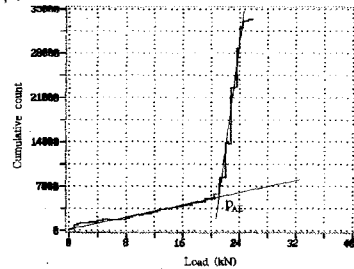


Fig. 5 K_Q calculated by ASTM E-399

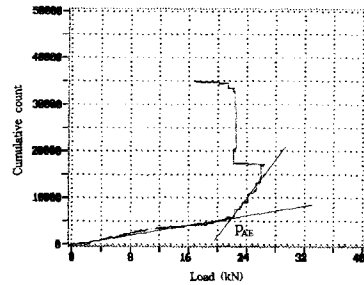
3.2 AE법에 의한 K_{AE} 결정

ASTM시험법에 준한 K_{IC} 와 J_{IC} 값은 균열진전개시점에 해당하는 실제의 정확한 값이라기 보다는 재료의 파괴인성을 실용적인 목적으로 공학적으로 구한 근사값이다. 따라서 정확한 파괴인성치 측정에 AE법의 적용타당성을 검토하기 위하여 K_{AE} 및 J_{AE} 구하고자 한다. Fig. 6은 AE법에 의하여 측정된 하중-N곡선의 대표적인 예를 나타낸 것이다. Fig 6(a)는 하중이 증가함에 따라 신호의 발생이 선형

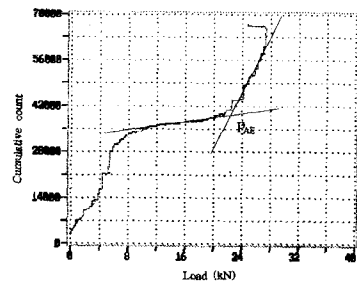
적으로 증가하다가 어느 하중부터는 신호가 갑자기 증가하고, 최대하중 이후에서는 신호가 발생하지 않는 형태이다. 이는 연성이 큰 재료의 경우로서 HTS-A의 GMAW 용접재 대부분에서 나타났다. Fig. 6(b)는 최대하중까지 Fig. 6(a)의 경우와 비슷하였으나 최대하중 이후에 많은 신호가 발생한 경우이며, SMAW 용접재 및 HTS-B 모재와 같은 취성이 큰 재료에서 나타났다. Fig. 6(c)는 초기하중 부근에서부터 신호가 많이 발생한 경우이며, HTS-A 용접재 (FT 1, FT 3)와 HTS-B HAZ(FT 14)에서 나타났다. 따라서 HTS-A GMAW 용접재, HTS-B HAZ는 연성이 크고, SMAW 용접재 및 HTS-B 모재는 하중-변위곡선에서 전체면적이 작은 취성이 큰 재료라고 생각된다.



(a) FT 2



(b) FT 11



(c) FT 14

Fig. 6 Load-cumulative count curve

Fig. 6의 하중-N곡선에서 균열선단의 소성변형과 불안전균열성장이 시작됨에 따라 신호가 많이 방출되어 선도의 기울기가 변하였다고 가정하여 그 부분의 하중을 균열개시하중인 P_{AE} 로 결정하고 이것을 통하여 K_{AE} 를 구하였다. P_{AE} 는 Fig. 6에서와 같이 두개의 직선을 구하여 직선이 만나는 곳의 하중을 P_{AE} 로 결정하였으며, Fig.6 (c)의 경우는 그림과 같이 두번째 변화점이 주균열의 성장으로 가정하여 P_{AE} 를 구하였다. Fig. 7은 K_{AE} 와 K_Q 를 결정하여서 나타낸 것이며, 전반적으로 K_{AE} 가 K_Q 보다 약 10%정도 크게 나타났고, 두 재료의 모재 및 HTS-A 용접재(FT 1, FT 3)의 대하여는 약 5%정도 작았다. 한편, Takahashi 등(8,10)은 AISI 4340 강과 7075-T651 알루미늄 합금에 대한 AE실험을 통하여 K_{AE} 를 결정하였다. 이렇게 구한 K_{AE} 는 K_{IC} 보다 약 5~10%정도 작았으며, 그 이유는 AE법은 균열개시점을 정확히 찾기 때문이라고 설명하였다. 이와같이 다른 연구결과와 차이를 보이는 것은 본 실험에 사용된 재료는 균열선단 부근에 소성역이 많이 발생하여 하중-변위곡선이 비선형적인 연성재료이기 때문에 ASTM시험법에 의한 결정이 실제 재료에서의 균열 개시점을 너무 낮게 평가하여서, 전반적으로 K_Q 값이 작게 나타났다고 생각된다.

이상과 같이 Fig. 6의 곡선으로부터 균열개시점을 결정할 수 있었으나, 재료의 신호 방출특성평가 및 구분은 어려웠다.

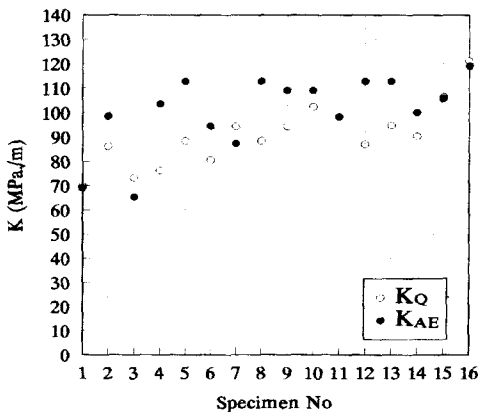


Fig. 7 Comparison of K_Q and K_{AE} defined by AE

3.3 J_{IC} 및 J_{AE} 측정

전절에서 구한 ASTM법에 의한 K_{IC} 측정실험의 경우 두 재료 모두 ASTM E399의 평면변형률조건을 만

족하지 못하였다. 따라서 두재료의 모재에 대하여 ASTM E813-89(11)에 준하고 AE를 병행한 J_{IC} 측정 시험을 수행하였다.

Fig. 8은 ASTM에 따른 J- Δ a 선도이다. 그림에서와 같이 HTS-A 재료의 J- Δ a 선도가 연성재료이기 때문에 훨씬 크게 나타났다. J- Δ a 선도에서 0.2mm 오프셋한 둔화선(blunting line)과 0.15mm와 1.5mm사이의 데이터로부터 구한 회귀선(regression line)과 만나는 값을 J_{IC} 로 결정하였다. 여기서 구한 J_{IC} 값은 ASTM E-813의 평면변형률 조건인 $B, b_0 > 25J_Q/\sigma_{ys}$ 와 $\Delta a_p - \Delta a_e < 0.15\Delta a_p$ 를 만족하고 있다. 그러나 HTS-A의 J-2는 컴플라이언스에 의한 균열길이와 실제 균열길이가 1.2mm정도 차이가 나기 때문에 J_{IC} 조건을 만족하지 못하였고, 다른 재료들도 역시 0.5mm정도 차이를 보이고 있다.

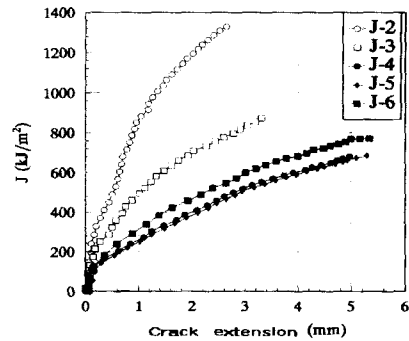


Fig. 8 J - Δ a curve for HTS-A and HTS-B

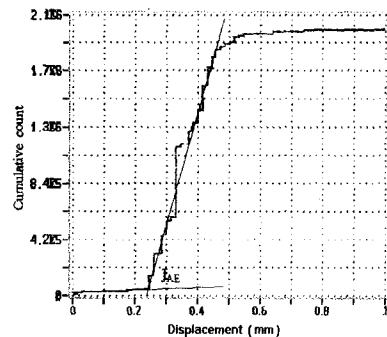


Fig. 9 Cumulative count vs. displacement curve for J-3

Fig. 9는 AE법으로 측정된 N-변위곡선을 나타내고 있다. 그림에서 변위가 증가함에 따라 신호가 선형적으로 발생하다가 어느 변위 이상에서는 신호

가 급격히 증가하고 있다. 그림에서 기울기가 변하는 점의 변위에서 J_{AE} 를 결정하였다.

Table 5 Comparison between J_{IC} and J_{AE}

Material	Specimen No.	J_{IC} (kJ/m ²)	J_{AE} (kJ/m ²)
HTS-A	J-1	-	-
	J-2	459	51
	J-3	249	67
HTS-B	J-4	119	115
	J-5	126	83
	J-6	152	97

Table 5는 실험결과를 정리한 것으로서, J_{AE} 값이 J_{IC} 값보다 훨씬 작았다. 여기서 J_{IC} 값은 0.2mm 안정균열성장(stable crack extension)했을 경우의 J-적분을 의미하며, J_{AE} 값은 균열성장 개시점에서의 J-적분이란 가정하에 구한 값이기 때문에 J_{AE} 가 작게 평가된 것으로 생각된다. 그러나 HTS-B의 경우는 J_{AE} 를 기준으로 두 값의 차이가 약 30%정도 이나 HTS-A의 경우는 차이가 약 500%정도이었다. 한편, 일본기계학회⁽⁶⁾에서 제정한 AE를 이용한 J_{IC} 시험에서는 여러가지 재료에 대한 AE실험을 통하여 J_{AE} 를 결정하였다. 실험한 재료중 연성이 큰 재료일수록 J_{AE} 를 결정하지 못하였으며, 전반적으로 J_{AE} 와 ASTM E813-81에 의한 J_{IC} 의 차이는 재료에 따라 약 10~300%정도이었다.

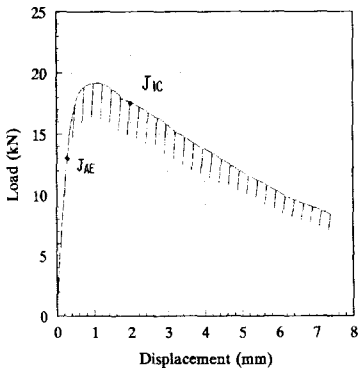


Fig. 10 Load vs. displacement curve for J-3

HTS-A의 J_{AE} 와 J_{IC} 값이 큰 차이를 보이는 것은, Fig. 10에 표시한 바와 같이 J-적분은 하중-변위에서 J-적분은 하중-변위곡선에서의 면적으로 계산하기 때문이다. AE법을 이용하면 연성재료의 경우

동공(void)성장이나 합체와 같은 미시균열까지 측정될 수 있기 때문에 거시균열성장 이전의 미시균열의 개시점을 찾아 그 점을 J_{AE} 로 간주할 수 있으므로 그 값이 너무 낮게 평가되었다고 생각된다.

3.4 AE 방출특성

3.4.1 재료별 진폭특성

AE의 진폭은 대체로 고강도, 이방성, 비균질재료와 결합을 내포하고 있는 취성재료일수록 높게 나타나는 것으로 알려져 있으며, 진폭분포는 파손 기구와 서로 상관관계를 갖는 것으로 보고되고 있다^(5,12).

Fig. 11은 각 재료의 진폭분포를 나타낸 것이며, 그림에서 Y축(Event)은 파형(Waveform)을 하나의 값으로서 계산한 것이고, X축(진폭)은 파형에서 최고 진폭을 표시한 것이다. Fig. 11(a)는 HTS-A의 모재, 용접재 및 HAZ에 대한 것으로, SMAW 용접재(FT 9, FT 10)의 경우 높은 진폭의 신호가 많이 발생하여 진폭분포가 다른 재료보다 높게 나타났다. 모재(FT 15)는 다른부위(GMAW : 용접재, HAZ)보다 진폭분포가 높게 나타났으며, 용접재(FT 1~FT 4)와 HAZ(FT 5~FT 8)는 용접봉, 예열 온도에 상관없이 비슷한 진폭분포를 가지고 있다. 용접재와 HAZ는 하중-변위곡선에서도 비슷한 경향을 보이고 있으며 연성안정균열전파에 의해 파괴된 것으로 생각된다. 그러나 FT 5(GMAW-HAZ)의 진폭분포는 모재의 경우와 비슷하며 전반적으로 용접재의 진폭분포는 HAZ보다 작았다.

Fig. 11(b)는 HTS-B의 진폭분포로 모재(FT 16)가 높은 진폭특성을 가지고 있으며, HAZ(FT 11~FT 14)는 모재보다 작은 진폭특성을 나타내고 있다. 이 중에서 FT 14(GMAW-예열150-LTEC 120)는 하중-변위곡선에서도 다른 부위에 비하여 연성적이기 때문에 진폭분포가 가장 작았다.

Fig. 11(c)는 HTS-A와 HTS-B의 진폭분포를 함께 나타낸 것이다. HTS-A의 경우 SMAW 용접재를 제외하고는 HTS-A가 HTS-B보다 연성적이기 때문에 낮은 진폭특성을 가지고 있다.

이상에서와 같이 취성이 큰 재료일수록 높은 진폭특성을 가지고 있으며, 진폭분포는 재료의 AE방출특성을 잘 평가하였다.

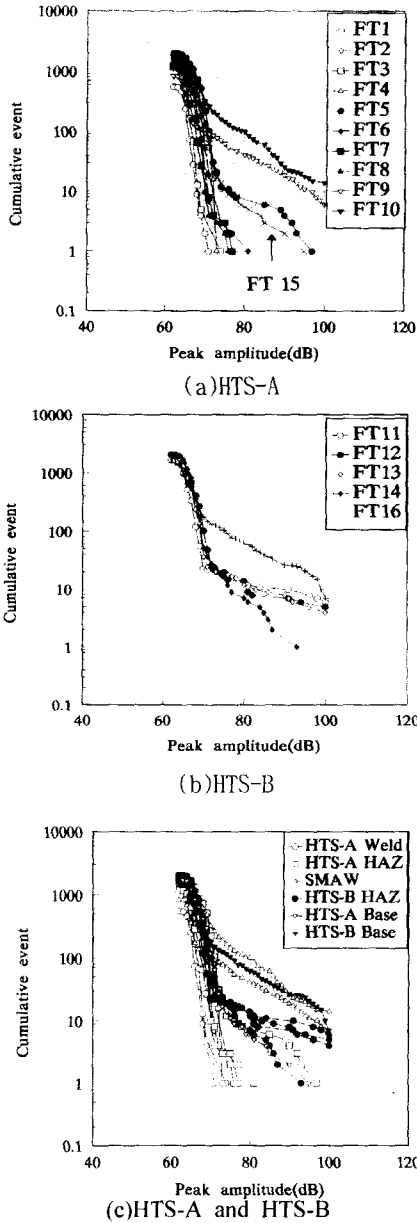


Fig. 11 Peak amplitude distribution

3.4.2 AE 방출특성의 분류

전절에서와 같이 진폭분포는 AE신호특성을 잘 나타내고 있으므로, Pollok등^(1,4,5)은 진폭분포의 특성을 평가하기 위하여 식(1)을 제안하였다.

$$N = a V_p^{-b} \quad (1)$$

식(1)의 경우는 진폭분포의 특성을 양대수 좌표에서 1차식으로 평가하게 되나, 본 실험의 경우에는 1차식으로 평가하면 이를 만족하지 못하므로 다음의 식으로서 평가하고자 한다. 따라서 Fig. 12(a)를 곡선적합하면 식(2)와 같고 dB는 식(3)과 같이 정의된다.

$$\log N = A \cdot \exp(-B \cdot \text{dB}) \quad (2)$$

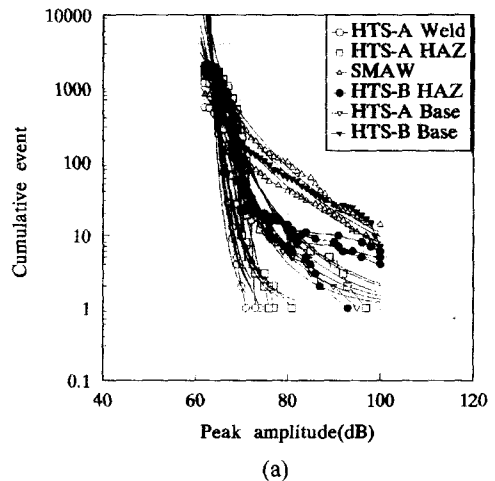
$$\text{dB} = 20 \log(V_p/100) \quad (3)$$

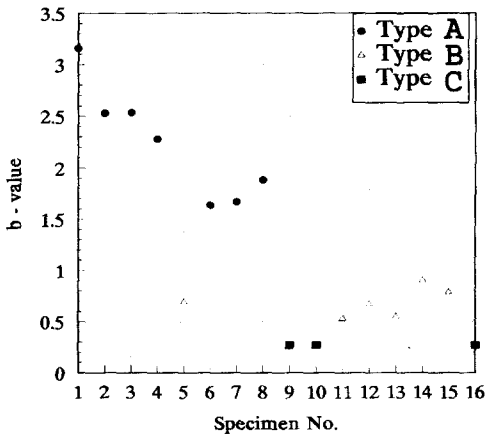
식(3)을 식(2)에 대입하여 정리하면 식(4)와 같다.

$$N = \exp(a V_p^{-b}) \quad (4)$$

여기서, N은 사상계수, V_p 는 진폭, A, B, a, b는 상수이다.

본 연구에서는 식(4)로써 AE신호특성을 평가하고자 하며, 식(4)는 b 값이 클수록 저진폭이 많아지며, b 값이 작을수록 고진폭이 많아지는 것을 의미한다. Fig. 12는 식(4)를 통하여 구한 곡선과 b 값을 나타낸 것이다. Fig. 12(a)와 같이 진폭분포는 크게 3가지로 구분할 수 있는데 첫째로 진폭이 가장 큰 부분(HTS-B base, SMAW)과 가장 작은 부분(HTS-A weld, HTS-A HAZ), 그리고 그 사이의 중간부분(HTS-A base, HTS-B HAZ)으로 구분할 수 있다. 식(4)를 통하여 구한 곡선은 실제 진폭분포를 잘 나타내고 있고, 또한 Fig 12(b)에서와 같이 b 값은 재료의 신호특성을 3부분으로 구분하고 있다. 따라서 b 값을 이용하면 재료의 진폭분포특성을 평가·분류할 수 있다고 생각된다.





(b)

Fig. 12(a) Peak amplitude distribution

(b) b-value obtained by equation (1)

이에 따라 재료의 신호특성을 b 값에 따라 Table 6와 같이 3가지 Type으로 분류할 수 있다. 즉 Type A는 b 값이 1.5 이상인 진폭이 작은 부분, Type B는 0.5와 1.5 사이의 중간 부분, Type C는 0.5 이하인 큰 부분이다.

Table 6 AE characteristics classification by b value

Material Type	HTS-A	HTS-B
Type A ($b > 1.5$)	Weld metal (FT 1, FT 2, FT 3, FT 4) HAZ (FT 6, FT 7, FT 8)	-
Type B ($0.5 < b < 1.5$)	HAZ (FT 5), Base metal (FT 15)	HAZ (FT 11, FT 12, FT 13, FT 14)
Type C ($b < 0.5$)	SMAW (FT 9, FT 10)	Base metal (FT 16)

한편 일본기계학회⁽⁶⁾가 제정한 방법에서는 AE 특성을 다음과 같이 3가지로 분류하고 있다. 신호 특성으로 분류하면 Type A는 하중초기단계에서 저진폭의 신호가 발생하고 최대하중 이후에는 신호가 발생하지 않는 경우이며, 균열전파형태는 동공(void)합체에 의한 연성안정균열전파이다. Type B는 Type A의 형태에 고진폭의 신호가 수십 개 섞인 형태이다. Type C는 불안전취성파괴에 의한 고진폭의 신호가 다수 발생하는 경우이다. 이렇게 신호특성으로 분류한 후 σ_{YS}/E 의 수치(Type A : <

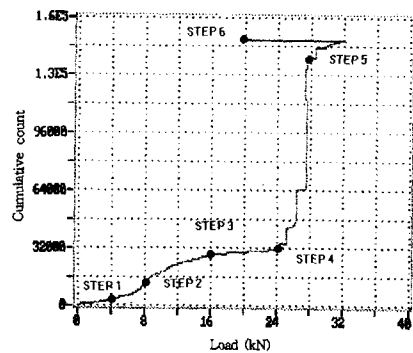
2.0, Type B : 2.0 ~ 3.7, Type C : > 3.7)로서 신호특성을 정량화하였다.

일본기계학회 기준으로 본 실험재료의 AE특성을 σ_{YS}/E 의 수치가 아닌 신호발생 형태로 분류할 경우 b 값으로 분류한 것과 거의 일치하였다. 그러나 일본기계학회에 따른 분류는 신호특성을 분류하고는 있지만, 이에 따른 AE신호를 파괴기준에 적용하는 것은 어려울 것으로 생각된다. 따라서 b 값으로 재료의 신호특성을 분류하여 파괴기준에 적용하고자 한다.

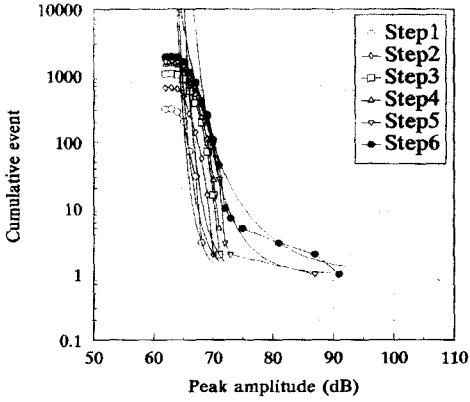
3.5 파괴과정 평가

3.5.1 Step에 따른 신호특성

Fig. 13과 Fig. 14는 HTS-A, HTS-B의 모재에 대한 각 Step에 따른 진폭특성을 표시한 것이다. 여기서 Step은 Fig. 13(a)와 Fig. 14(a)에서와 같이 하중-N곡선의 기울기가 변하는 점까지의 하중을 나타낸다. Fig. 13(b)에서 각 Step과 하중이 증가함에 따라 균열전단의 소성변형에 의하여 저진폭의 신호가 발생하였고, Step 4부터 균열이 진전하기 시작하여 고진폭의 신호가 발생하였다. HTS-B도 역시 Fig. 14(b)와 같이 Step 4까지는 저진폭의 신호가 발생하다가 균열진전에 의한 고진폭의 신호가 발생하였다. 그러나 HTS-A는 연성이 큰 재료이므로 고진폭의 신호가 많이 발생하지 않았고, HTS-B는 취성이 큰 재료이기 때문에 고진폭의 신호가 많이 발생하였다. 이와같이 진폭분포의 변화로써 균열개시점을 찾을 수 있지만, 연성이 큰 재료의 경우는 고진폭의 신호가 발생하지 않는 경우도 있으므로 진폭분포의 변화를 이용하여 균열 개시점을 찾기는 어려웠다.

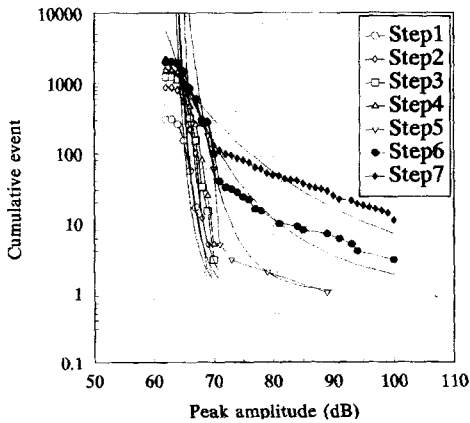


(a)

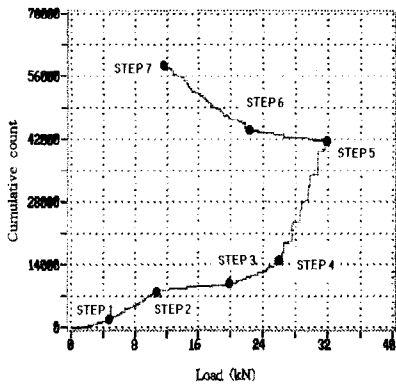


(b)

Fig. 13 (a) Count vs. load for HTS-A
(b) Peak amplitude distribution in each step



(a)



(b)

Fig. 14 (a) Counts vs. load for HTS-B
(b) Peak amplitude distribution in each step

진폭특성을 나타내는 b 값은 식(4)를 통하여 Step별로 구하여서 Fig. 15에 나타내었다. HTS-A, HTS-B 모두 Step 4까지는 저진폭의 신호가 발생하여 b 값이 4 이상이며 Step 5부터는 고진폭의 신호가 발생하여 b 값이 2 이하로 갑자기 작아짐을 보이고 있다. 이렇게 b 값이 갑자기 변화하는 것은 재료의 파손과정이 달라지기 때문이라고 생각된다. 즉 Step 4까지는 균열전단의 소성변형에 의한 것이라 생각할 수 있고, 그 이후에는 균열진전에 의한 신호라고 평가할 수 있다. 따라서 Fig. 14로부터 재료내에 균열이 존재하고 균열전단에 소성변형이 발생하는 경우의 b 값은 4 이상이며, 균열이 성장하는 경우의 신호는 2 이하로 평가할 수 있다. 따라서 전절에서 b 값으로 분류된 Type B, Type C 재료의 경우에는 b 값의 변화가 구조물의 안전성 평가를 위한 파괴기준으로 적용이 가능하며, Type A와 같이 고진폭의 신호가 발생하지 않는 경우는 적용이 불가능할 것으로 생각된다.

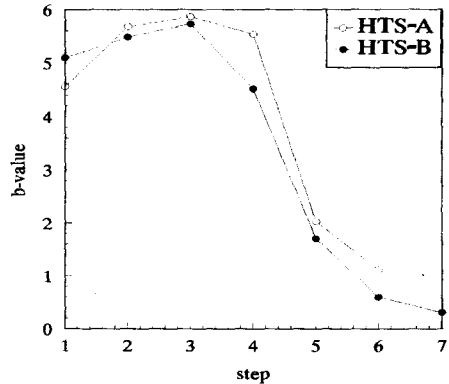


Fig. 15 b Value obtained between event and amplitude in each step

3.5.2 균열진전에 의한 신호특성

AE신호는 소성변형에 의한 신호보다는 균열진전에 의한 신호의 진폭이 크며, 취성재료일수록 진폭이 큰 신호가 많이 발생한다고 알려져 왔다. Fig. 16(a)는 P_{AE} 하중 이전까지의 유지시간(duration)과 진폭의 관계를 나타낸 것이고, Fig. 17(a)는 상승시간(rise time)과 진폭의 관계를 나타낸 것이다. 그림과 같이 균열이 진전하기 이전까지는 진폭이 작으나, 유지시간과 상승시간은 작은 신호부터 큰 신호까지 다양하게 분포하였다. 이것으로 그 이전까지는 진폭이 작은 연속형 신호가 발

생하였다고 추정할 수 있다.

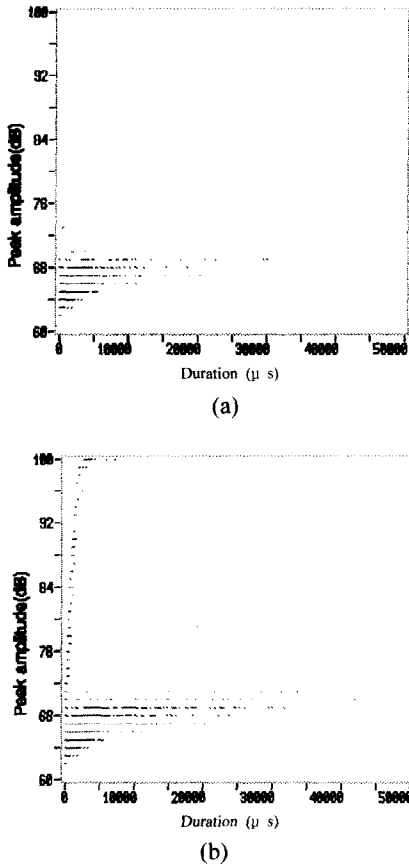


Fig. 16 Duration vs. amplitude relationship
(a) before P_{AE} (b) final load

Fig. 16(b)와 Fig. 17(b)는 마지막 하중까지의 유지시간, 상승시간과 진폭의 관계를 나타낸 것으로, 소성변형에 의한 신호와 균열진전에 의한 신호가 합쳐진 상태이다. P_{AE}하중 이전까지의 신호특성과 구분이 되는 것은 Fig. 16(b)와 같이 진폭이 크고 유지시간이 작은 신호와 진폭이 작고 유지시간이 큰 신호이다. 그러나 균열진전에 의한 신호는 진폭이 크고 상승시간이 작은 신호이다. Fig. 17(b)에서는 상승시간이 작고 진폭이 큰 신호의 집단이 하나의 직선으로 명확히 구분된다. 이러한 사실은 Christoph 등⁽⁷⁾이 제안한 ZB2-Vessel에 대한 모형실험과 파괴실험을 통하여 균열진전에 의한 신호와 균열표면파찰에 의한 신호는 상승시간으로 구별할 수 있으며, 균열진전에 대한 신호는 상승시간

이 작다는 주장과 일치한다.

이와같이 본 실험에 사용된 재료의 균열진전에 의한 AE신호는 유지시간과 상승시간이 작고 진폭이 큰 신호라고 평가할 수 있다.

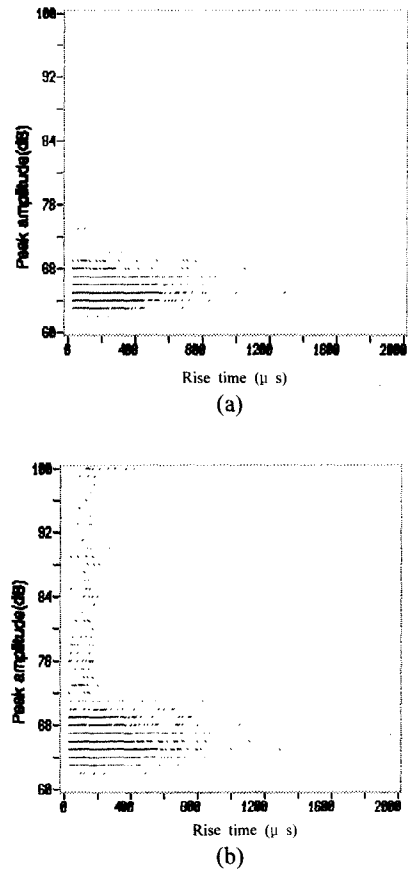


Fig. 17 Rise time vs. amplitude relationship
(a) before P_{AE} (b) final load

4. 결론

AE를 이용하여 고장력강인 HTS-A강, HTS-B강의 모재, 용접제 및 HAZ등에 대한 파괴인성실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 하중과 사상계수(N)의 관계로부터 P_{AE}를 구하여 파괴인성치인 K_{AE}를 결정하는 것이 가능하며, 전반적으로 K_{AE}가 ASTM에 의한 K_Q보다 약 10%정도 크게 나타났다. 또한 AE법을 이용하여 J_{AE}를 결정할 경우 연성재료에서는 주 균열의 발생이전 미시

균열에서부터 신호가 발생하여 미시균열의 개시점 (보이드 성장이나 합제)을 찾기 때문에 실제 균열 개시점을 너무 낮게 평가하고 있어서 AE법의 적용이 어렵다.

2. AE 진폭분포는 파손기구와 밀접한 관계가 있으며 재료의 신호특성을 잘 나타내었다. 이에 따라 진폭과 N의 관계를 정량화한 상수값으로 각 재료의 신호특성을 분류할 수 있었다.

3. b 값의 변화가 재료의 파괴과정을 잘 나타내고 있으며, b 값이 4 이상인 경우는 균열을 가지고 있고 균열선단의 소성변형이 발생한 경우를 나타내고 2 이하인 경우는 균열이 성장하고 있음을 나타낸다. 또한 균열진전시의 AE신호특성은 유지 시간과 상승시간이 작고 진폭이 큰 신호이다.

후기

본 연구는 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비 안전성 평가 연구센터와 국방과학연구소의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

1. Scott, I.G., "Basic Acoustic Emission," GORDON AND BREACH SCIENCE PUBLISHERS, pp.80~130, 1991.
2. Hutton, P.H., "Acoustic Emission Applied Outside of the Laboratory," ASTM STP 505, pp. 114~128, 1972.
3. 이주진의 13, "장치산업 설비 안전성 시험 검사 기술개발 (3차년도)," 표준과학연구소 보고서 KSRI-87-22-IR, 1989.
4. Nakamura, Y., "Amplitude Distribution of Acoustic Emission Signals," ASTM STP 505, pp 164~186, 1972.
5. Kanji, O., Teoh, H.B., "Acoustic Emission in Fracture of Structural Materials with Non-Metallic Inclusions," Journal of Acoustic Emission Vol.6, pp.1~12, 1987.
6. "AEによる J_{IC} 試験," JSME S 001-1992, pp.84~104.
7. Christoph, S., Waschkies, E., "Detectability of Defects in Reactor Pressure Components by

Location and Interpretation of AE-Sources," ASTM STP 1077, pp 199~209, 1991.

8. Blanchette, Y., Dickson, J.I., "The Use of Acoustic Emission to Evaluate Critical Values of K and J in 7075 - T6H Aluminium Alloy," Engineering Fracture Mechanics Vol.20, pp.359~374, 1984.
9. "Standard Test Method for Plan Strain Fracture Toughness of Metallic Materials," ASTM Standard E399.
10. Takahashi, H., Khan, M.A., "Acoustic Emission Crack Monitoring in Fracture Toughness Test for AISI 4340 and SA533B Steel," Experimentals Mechanics Vol.35, pp.89~99, 1981.
11. "Standard Test Method for J_{IC} , A Measure of Fracture Toughness," ASTM Standard E813.
12. Raj and T. Jayakumer, "Acoustic emission during tensile deformation and fracture in austenitic alloys," ASTM STP 1077, pp 218~239, 1991.